应用手册 **AN2227**

无刷直流马达控制

作者：Andrey Magarita
相关项目：是
相关器件系列：CY8C27xxx
PSoC Designer：4.2
相关应用手册：AN2170

摘要
本应用手册介绍了如何采用无传感器、反电动势技术对无刷直流（BLDC）马达控制实施PSoC。

引言
BLDC马达广泛用于工业应用、家用电器以及车辆系统中。此类马达由放置在转子上的多极永久磁铁以及若干绕组组成 [1]。

可采用各种方法来控制BLDC马达。其中最简单的方法就是采用转子位置传感器。传感器可以是光的、磁的（霍尔效应或基于磁阻效应）或感应的。但是，在传感器稳定性要求较高的恶劣环境中运转马达时，采用传感器会增加成本并带来可靠性问题。不断提高的嵌入式计算能力再加上较低的功率半导体器件与微控制器的价格，使更为复杂的马达控制方法变为现实。其中一种流行的方法是使用反电动势（back-EMF）信号，该信号由围绕激励线圈旋转的转子永久磁铁感应产生。

本应用手册介绍了如何使用反电动势感应形成BLDC马达驱动器。

马达驱动器具有以下特征：

- 在有载与空载时均能可靠地启动马达；
- 当传动轴上的负载发生变化时也可稳定运行；
- 当电源与负载波动时仍可保持转速稳定；
- 过载保护；
- 利用预定的速度表进行运行时转速控制；
- 错误诊断与故障排除。

该驱动器与众不同的特征是它使用了三个PSoC™混合信号阵列低通滤波器（LPF），安装在PSoC的开关电容器（SC）块的四周。这些滤波器是二阶贝塞尔滤波器，用于驱动相位转换机制中的相位延迟，从而在马达轴上生成最佳的转矩。

我们建议的方案使用额定电源为220V的75WBLDC马达。但是，该方案也适合12V、24V、48V或120V电源的马达；只有相电压电阻分压器与马达线圈电平转换器（通常称为线圈驱动器）必须适用专用马达。表1列出了马达驱动器的主要特征。

表 **1.** 驱动器规格

参数	值
相位数	3
输入电压	220V AC ±20%
输出功率	100W
最大输出电流	3.5A
输出信号频率 最小值 最大值	 50 Hz 120 Hz
马达	BLDC、无传感器
马达磁极对数	4

驱动器流程图

驱动器流程图如图1所示。电源电路包括：

- o AC输入线路噪声滤波器；
- o AC线路LC滤波器；
- o AC电源整流器；
- o 一个降压调节器，可产生稳定的15V与5V电源（未在流程图中显示）；
- o 一个具有电平转换器的三相电桥，可使用低功耗数字信号来控制该桥。

为了简化起见，略去了驱动器状态显示LED指示灯与速度设置开关。

图1仅提供了驱动器的详图。电源模块相对简单，此处并未进行查验。该驱动器由IGBT晶体管的桥接芯片驱动器与测量电流的电流感应电阻器组成，该电流与电桥臂总电流成比例。IGBT电平转换器能够将来自PsoC（控制桥总线）的逻辑电平信号转换成适合驱动IGBT桥的低电平与高电平。国际整流器IR2130芯片可用作IGBT驱动器。此芯片包含的元件可防止桥晶体管出现过电流情况、低功耗电压输出级以及内部停滞时间控制。这些特性使得PSoC能够将其资源集中在马达控制上，并且只有当IR2130引发复杂的*驱动器故障*事件时才做出反应。通过将这些功能集成到PSoC器件中，可以使用较低成本的驱动器。

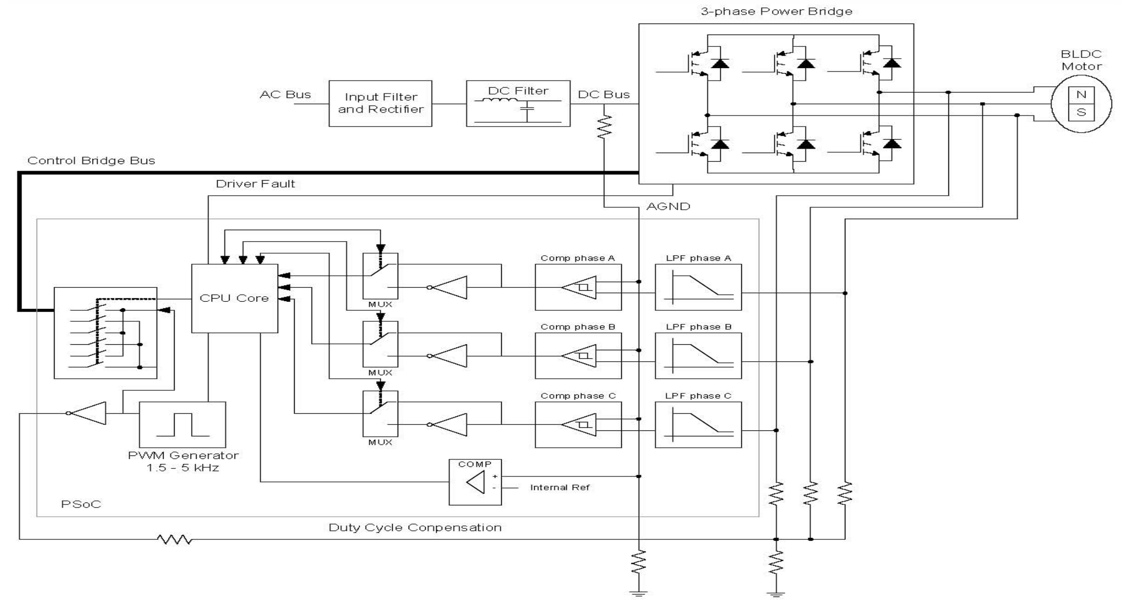


图1. BLDC马达驱动器流程图

该器件可处理来自电源驱动器电路的以下信号：

- o 与IGBT驱动器的输出相位电压成比例的三种电压信号。
- O 电压信号指的是DC总线电压信号。此信号为PSoC模拟接地（AGND）信号。电阻分压器削弱了此信号，从而使相位信号加倍。
- O 故障信号至少指示一个故障事件的发生。

相位电压信号进入LPF中。其截止频率比马达驱动器生成的相位转换频率高出三倍。

PSoC模拟块对相位电压进行处理。

如上所述，PSoC的AGND是浮动的，并且与DC总线电压的一半成正比，该总线电压是经过整流与滤波的AC电源电压。

LPF有可两种功能。一是为马达相位电压生成必要的相位延迟。在此类应用中的马达运转，最佳相位延迟为30度。二能是从PWM频率中过滤掉相位电压，以生成接近于正弦曲线的信号波。当过滤的信号穿过AGND时，会触发内部比较器并确定下降沿信号和上升沿信号。在运行时，在固件中LPF会确定等待边沿类型以及查询的相位信道。在固件中，比较器触发器将启动中断操作。

PWM发生器为电桥高电平侧形成脉宽调制信号。电桥低电平侧由恒定、清晰的逻辑电平控制。

电桥高电平侧PWM信号发送是通过固件控制的内部多路信号分离器完成的。请注意，相对于AGND分配的相电压是不对称的。当设置的PWM占空比较小时，会产生很大的影响。为了解决这一问题，需将单个补偿电压同时添加到三相信号中。此电压与PWM占空比成反比，并且通过反转与滤除PWM输出信号而生成。

使用可编程电压窗口比较器可以实施DC总线电压监控。如果DC总线（为电桥高电平侧供电）的电压高于或低于预设值，比较器就会中断。这会使马达停止运转，从而阻止其在不安全的区域工作。如有必要，可以使用模数转换器（ADC）来监控DC总线电压。

器件原理图

附录A显示了器件原理图。

器件包含三个元件。电源元件有：

- o 电源滤波器
- o 整流器
- o DC总线滤波器
- o IGBT晶体管电桥
- o 低压器件电源的电压转换器

第二个元件是IR2130驱动器及相电压分压器。第三个元件是PSoC芯片与速度选择器。速度选择器由控制外部速度的光学耦合器（可实现电隔离，并与手动控制速度的DIP开关并联）组成。三个LED指示灯会显示告警事件。这三个器件采用了三种不同的电路板，以便为专用的马达应用提供更大的灵活性。

器件运行详细信息

如上所述，马达控制系统采用无传感器的反电动势技术。在转子旋转过程中，马达绕组可作为位置传感器。为了实现这一点，在传感器位置模式下工作的绕组将与线路电源断开。通过旋转马达转子上的磁铁，可以在绕组上产生感应电压。电压变换的信号与方向可指示转子磁极相对于定子绕组的位置。

PSoC的主要任务是使用产生的电压检测转子的位置，并以新驱动相位协助转子按所需方向旋转的方式执行相位转换。这是保证马达旋转稳定性的主要条件。

初看起来，似乎每个相位上使用一个简单的比较器即可正常工作。但反电动势电压会形成较复杂的波形，如附录D中图6所示。在图6中，可以清楚地看到临近的绕组产生的PWM感应噪声，这是因为反电动势绕组没有负载。

有两种方法可以将反电动势信号与有害的噪声分开。第一种方法是使用低通滤波来抑制PWM感应噪声。第二种方法是当PWM信号处于不活动状态且绕组的瞬态过程完成时进行相位电压分析。这种方法适用于具有低PWM占空比值或低功耗马达，其中线圈之间交叉耦合的感应 / 电容非常微弱。当采用PSoC LPF时，第一种方法对噪声抑制非常有效。滤波后，可以很容易将信号与参考信号进行比较。

所有滤波器均有相位延迟。这一延迟取决于信号频率。因此，在转子旋转频率变化的同时绕组随之换向。这可能导致反电动势信号同步损失或很大的转矩波动。针对此问题有两种解决方案：

1. 使用相位校正滤波器，模拟的或数字的，在工作频率范围内提供接近常量的相位延迟。
2. 应用基于可调常规开关电容器的滤波器。

第一种方法要求使用复杂的模拟电路或更昂贵的DSP内核进行多通道信号处理。此类固件必须以实时方式连续读取与处理三个ADC的转换。驱动控制器还需执行其它任务，如速度控制。这就使得第一种方法很难通过低成本微控制器来实现。第二种方法要求传统微控制器时滤波器可进行外部重新配置。这会提高驱动器价格并使电路变得更加复杂。然而，PSoC内部有许多固件控制的滤波器。因此，最佳解决方案即为使用可调LPF方法。这可以达到价格、质量与复杂性的最佳组合。

相位延迟滤波器可以置于三个PSoC列中，并且内置式比较器可用来检测输出交叉信号。贝塞尔滤波器为首选器件，因为在截止点之前它们的相位延迟与频率成线性关系。滤波器相位延迟在截止频率处为90度。SC滤波器截止频率直接与滤波器时钟速率成正比，从而可以通过适当地调节滤波器时钟频率，在整个输入频率范围内提供稳定的相位延迟。该相位延迟等于转子磁极与定子绕组在换向瞬间所形成的恒定角度。在此应用中，相位延迟角度保持在30度。在可编程期内使用16位计数器可以生成滤波器的时钟速率，可在PSoC数字资源中进行分配。

每个SC滤波器都有一个可将滤波器输出信号与AGND信号进行比较的输出比较器。比较器输出可驱动比较器总线，在软件或触发器中断时可以对总线进行查询。根据固件中的预配置，内置查找表（LUT）可以触发比较器总线上升沿或下降沿上的中断。该功能用来检测反电动势信号的跨零事件以及为马达绕组生成换向的信号。每个滤波器都会使用专用的状态机触发在固件中的中断，并通过修改LUT控制寄存器的内容来确定下一个相位转换命令及调整运行时的下一个中断极性。

注意，每次马达相位变化时，下一个预期的反电动势信号极性的变化方向均与上一个相反。因此，在刚开始变化时使用触发的中断服务程序（ISR）中的LUT时，比较器总线信号是反相的。对于触发多个中断时可造成滞后现象与附加的噪声抗扰度。

图2与3说明了驱动器与马达工作的主要原理。A、B与C是马达相位上的电压。UP_A、DOWN_A、UP_B、DOWN_B、UP_C与DOWN_C是桥接旁路控制电压。UP是上面（高电平侧）的旁路。DOWN是下面（低电平侧）的旁路。高电平用“on”状态指示，而低电平用“off”状态指示。INT是相位上的中断信号。A30、B30及C30 是比滤波后的电压相位延迟了30度。

这种架构的一个特性是仅在上面的桥接旁路（高电平侧）处供给控制PWM的电压。这会相对于电源DC总线电压的一半产生不对称的信号。

当PWM占空比较低时，经过滤波的相位电压远远低于电源电压的一半。这种情况再加上DC总线上的纹波（在滤波器的通带中），可能会导致马达启动时在比较器上产生错误的触发动作。为了避免这一点，补偿网络使用了反相的PWM信号，并将三个滤波器一起进行偏置。这会在整个PWM占空比范围内将滤波器的DC组件电压提高到DC电源电压的一半。

为此，反相的主PWM信号被发送到外部引脚，并采用带有分压器（驱动器原理图上的R4、C5与R5）的RC滤波器来进行滤波。因此，C1 DC电压与主PWM DC组件电压成反比。将C1的分压与相对于PSoC数字接地的反电动势信号相加，并补偿相对于“DC总线输入”信号的DC组件的分压。图12显示了最小／最大转速与最小／最大PWM占空比值对应的补偿电压。Channel_1显示了反相的PWM信号，而Channel_2显示了补偿电压。

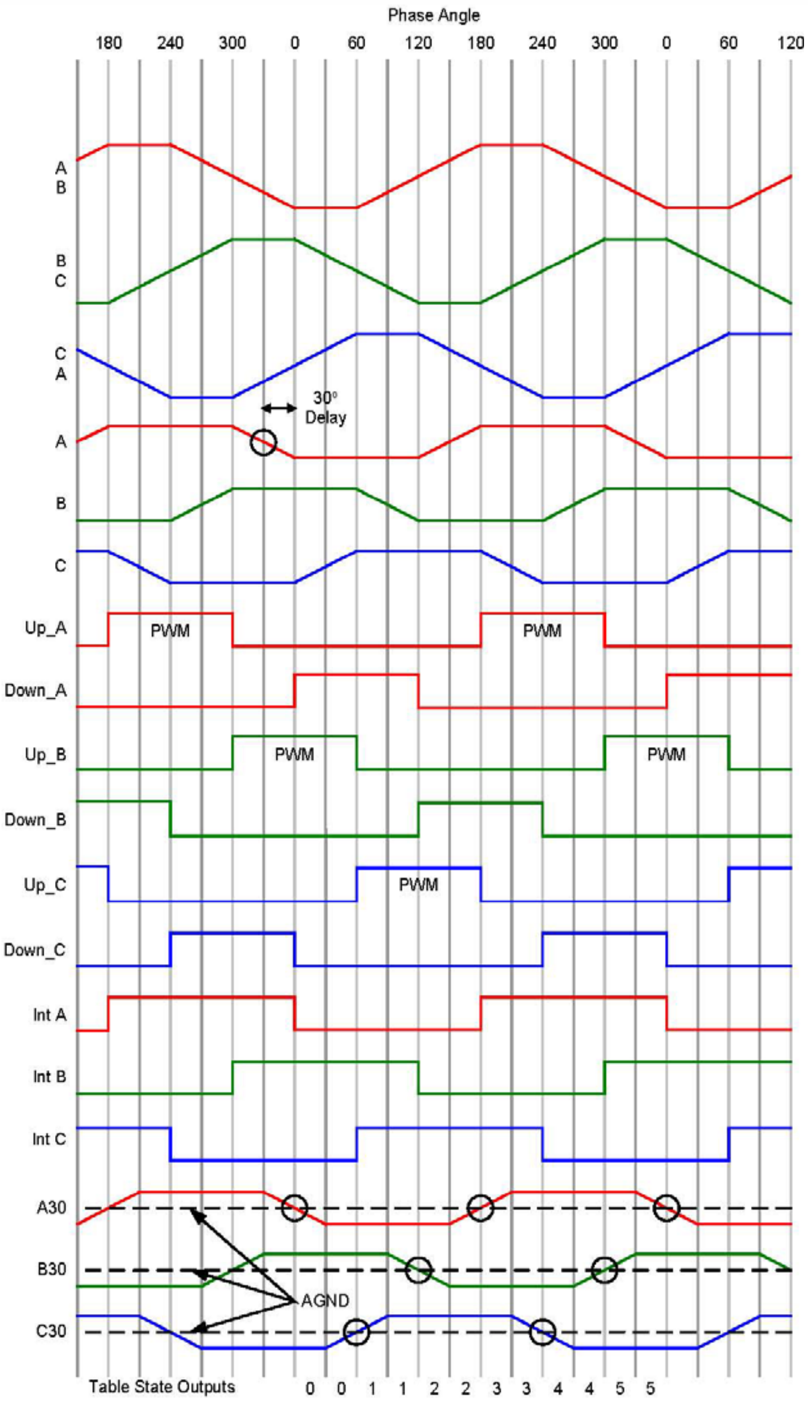

Phase Angle
180 240 300 0 60 120 180 240 300 0 60 120
A
B
B
C
C
A
30°
Delay
A
B
C
Up_A
PWM
PWM
Down_A
Up_B
PWM
PWM
Down_B
Up_C
PWM
Down_C
Int A
Int B
Int C
A30
B30
AGND
C30
Table State Outputs
0 0 1 1 2 2 3 3 4 4 5 5

图 **2.** 驱动器相位信号

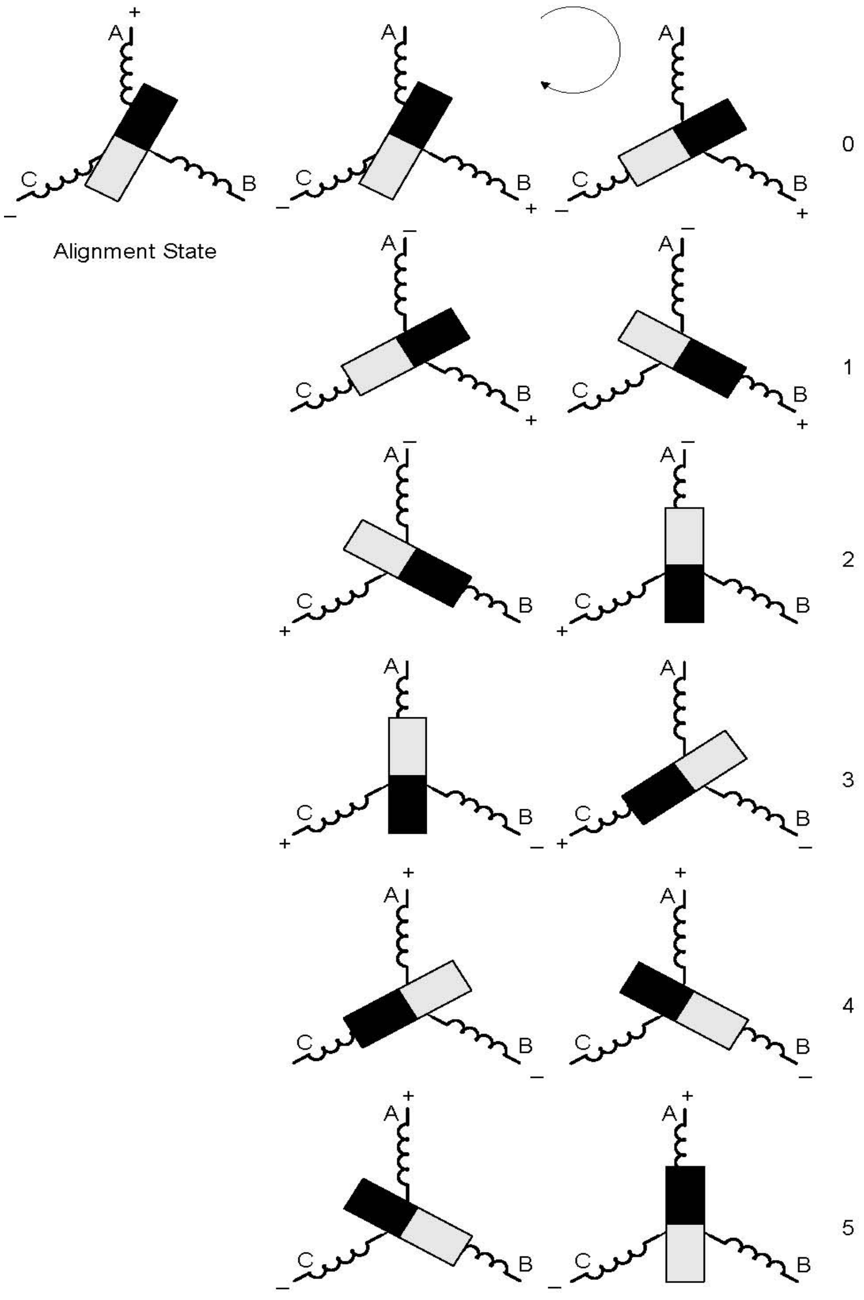


图 3. 不同相位驱动信号的转子位置。

如欲了解电压图，请参见图2

驱动器运行包含以下几个阶段：

1. 停止阶段

事件触发器会标记出哪一个事件触发了停止阶段。如果计数器未超出预设阈值，则PSoC会读取速度设置开关。在这种状态下，所有电桥驱动器均关闭，并且PSoC对速度设置开关进行查询。通过设置非零速度值可以退出这一阶段。请参见表3了解可能的速度值。

2. 完全停止阶段

在马达启动失败次数达到预设的尝试次数后，驱动器进入完全停止阶段。LED D2指示这一阶段。只有通过上电复位才能从这一阶段重新初始化驱动器。

3. 驱动器准备阶段

IR2130驱动器具有自举电容器功能。自举电容器必须充电到10V才能使用。否则，不管控制信号是什么，高电平侧的输出都会关闭。在这一阶段必须接通电桥低电平侧的功率晶体管。

为了预先对自举电容器充电，需接通低电平侧的晶体管，并询问IR2130输出*驱动器故障*。如果信号很弱，则关闭低电平侧功率晶体管，然后重复这一过程。此外，必须通过打开／关闭晶体管来清除内部IR2130驱动器的错误标记。

驱动器准备阶段如图10所示。Channel_1显示了在最初PWM占空比确定期间，马达线圈绕组电流传感电阻器的电压。Channel_2显示了“故障驱动器”信号，当电流达到3.5A时会触发该信号。此信号的下降沿将关闭IR2130 内部的电桥驱动器，并将这一状态存储在驱动器内部触发器中。为了使IGBT驱动器正常运行，应清空此触发器。通过应用任何低电平侧电桥控制输入的下降沿，可以在预设的断开时间内清空此触发器。在与此应用手册相关的项目中，通过对相位C的下级开关应用脉冲，并在软件中查询“故障驱动器”，对触发器进行复位。如果在2毫秒内未能清空“故障驱动器”信号（无法复位触发器），则中止马达启动尝试并设置马达启动错误标记。

4. 绑定阶段

在绑定阶段有两项操作。首先，通过对两个绕组应用驱动电压，将转子设定在预先确定的启动位置。其次，确定可能的最大启动占空比。此占空比与马达启动电流成比例。在绑定阶段设置的转子位置显示在图3的左边。按照转移表改变必要绕组的电流方向。这一阶段的PWM发生器频率设置为1.5kHz。然后占空比每0.8毫秒递增一次。每次递增PWM占空比后，都会查询*驱动器故障*输出。如果*驱动器故障*等于零，则马达绕组电流超过最大可能值。在示例方案中，最大值设置为3.5A。*驱动器故障*输出一达到零值，PWM占空比就不再增加。

同样，AC纹波电压的幅度也取决于DC滤波器参数。如果将此测量的占空比直接选为最大PWM脉冲宽度，则过电流保护可能会过早关闭马达。因此，必须略微降低最大的可测量占空比，以防止错误地触发过电流保护。在示例方案中，测量的占空比降低25%，并用于启动PWM占空比值。

5. 自由运行阶段

在这一阶段，转子开始旋转并与反电动势信号保持同步。该阶段的PWM工作频率设置为5kHz（可提高到8 kHz）。使用附录B中的表4确定每种绕组组合的中断时间，单位为PWM周期（200 微秒）。可以使用可重新编程的16位计时中断来控制，PSoC的*周期计数器*可实现此目的。

马达启动期间相位转换事件之间的时间间隔比马达正常运转期间的时间间隔长得多。因此，马达线圈会在驱动阶段积累更多能量。尽管在线圈驱动停止时IGBT的晶体管具有反向电流保护二极管，但需要相当长的时间来消散这一能量。只有当消散掉了所有存储的能量并关闭二极管后，才会收到反电动势信号。这会限制感测反电动势信号的时间间隔。使用专用16位计数器可以设置与电流相位转换周期成正比的延迟。这确定了应感测有效反电动势信号的间隔。由于PSoC具有动态重新配置功能，因此今后还可将此计数器用于其它用途。

LPF截止频率在该驱动阶段具有固定值，并用PSoC配置中的专用16位计数器*Filt_Counter16*进行设置。

在每次相位转换事件（从第二次转换事件开始）之后都会感测到反电动势信号。如果能正常收到预期事件，则驱动器将退出自由运行阶段，并切换到同步旋转状态。

图13显示了马达启动过程以及反电动势控制模式开关。对于马达启动，通过逐步缩短线圈转换的时间间隔，在自由运行阶段使转子加速旋转。这些间隔比正常相位转换间隔更长。在这些间隔期间，转子可能会达到使轴扭矩下降的平衡位置。为了达到最大的启动扭矩，可以通过分析反电动势信号来实现线圈换向。在自由运行阶段对反电动势信号进行分析。这发生在第二次绕组换向之后，并且跨AGND电平的第一次有效反电动势信号变换将结束自由运行阶段，然后切换到反电动势感应的阶段。反电动势信号通过环路中查询的比较器总线控制寄存器软件进行分析，这一点与感应状态的中断驱动操作不同。通过减少不必要的自由运行阶段操作时间，在马达启动期间，采用反电动势信号分析可降低马达电流的过载，自由运行阶段的特征为绕组电流较大。

6. 感应旋转阶段

相位转换由反电动势信号启动，通过LPF可以在相位平面上延迟该信号。这是主要的马达操作阶段。绕组换向的周期由周期计数器测量，其准确度等于PWM周期的1／32。采用PI调节器该值可用来调整转子的旋转频率。

计数器终端计数中断可用来产生中断时间来等待适当的反电动势信号。

如果断开时间已过且未收到任何反电动势信号，则控制状态机会退出感应旋转状态、切换到停止状态，并增大驱动器启动尝试计数器的最大值。当该计数器达到阈值时，驱动器切换到完全停止阶段，并打开LED错误指示灯。

PI调节器将计算PWM占空比，以保持恒定的转速，并且每到第六次换向周期相位时激活一次。这对应于一个电马达周期。在此环路中查询速度设置开关，如果读取到新的值，则设置新的LPF时钟频率及新的PI调节器的参考值。

为了设计出最佳的转速控制PI调节器，应了解以下特征：

- o 有载与空载的马达转换功能；
- o 调节控制参数，如合适的控制过冲与最长的速度设置时间。

由于此方案是为了演示在无传感器BLDC马达控制中的PSoC，因此采用简单的方法来实施PI调节器。如上所述，速度控制会在每个马达电周期内感应一次。旋转周期通过使用测量计数器来确定。由于基准（T^{ref}）周期与测量（T^{mes}） 周期之间存在差异，因此会获得调节器输入信号。使用以下公式可以计算新的PWM值。

$$\Delta t_i = T^{ref} - T_i^{mea} \qquad (1)$$

$$P_i^{PWM} = \frac{(K_{int} - 1)D_{i-1}^{PWM} + K_{int}\Delta t_i}{K_{int}} + K_{prg}\Delta t_i$$

$$D_i^{PWM} = \max\left[\min\left(\frac{17}{16}D_{i-1}^{PWM}, P_i^{PWM}\right), \frac{15}{16}D_{i-1}^{PWM}\right] \qquad (2)$$

比例项：

$$K_{prp} = 1/32$$

在本示例方案中，其是凭经验选择为马达选择的。选择的积分项为：

$$K_{int} = 1/32$$

该值与比例项相同。最终用户可以根据负载具体要求调节调节器系数。

限制最大的PWM变化速度值，尽力避免PWM占空比随着时间的推移发生较大变化。在示例方案中，将调节器系数的幂选为2。但是，PSoC电源足以（由于存在内置的MAC）运行其它系数的调节器。

IR2130*驱动器故障* 的下降沿可触发中断，从而关闭所有电桥晶体管、退出当前状态、进入停止状态，并打开LED D1指示灯（请参见原理图）。如上所述，在延迟几秒时间后，马达会进行几次从停止状态重新启动的尝试。

在感应状态下也会检测达到一定速度的额定时间。如果在预定的中断时间内，马达转速未达到额定值的 7／8，则驱动器将退出感应状态并切换到停止状态。用马达旋转周期来测量这一时间。LED D3显示达到额定转速的时间超出中断时间。

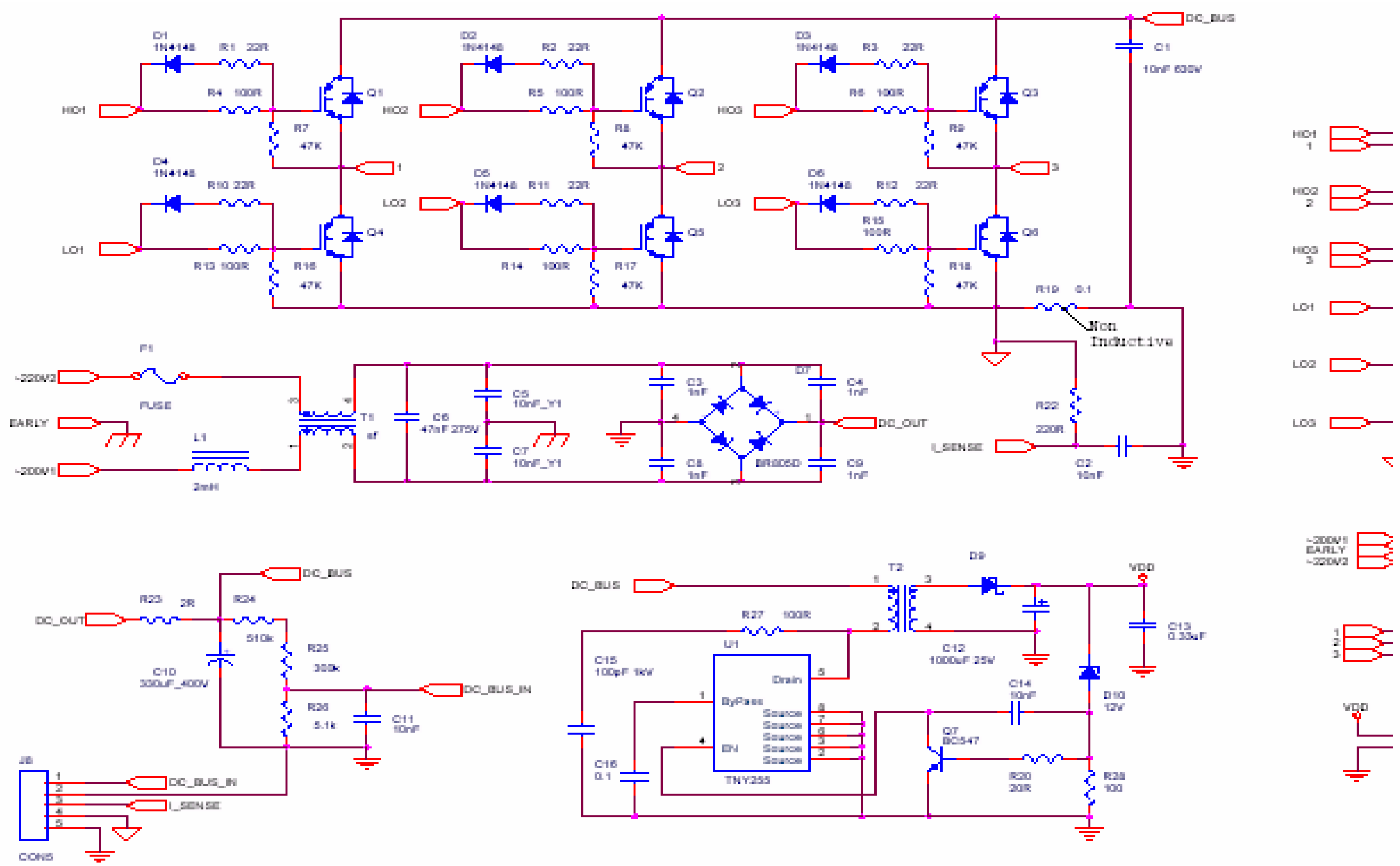
小结

本应用手册向您展示了PSoC无传感器BLDC马达驱动器。只需稍微修改一下硬件与软件，即可使用该驱动器来控制BLDC。

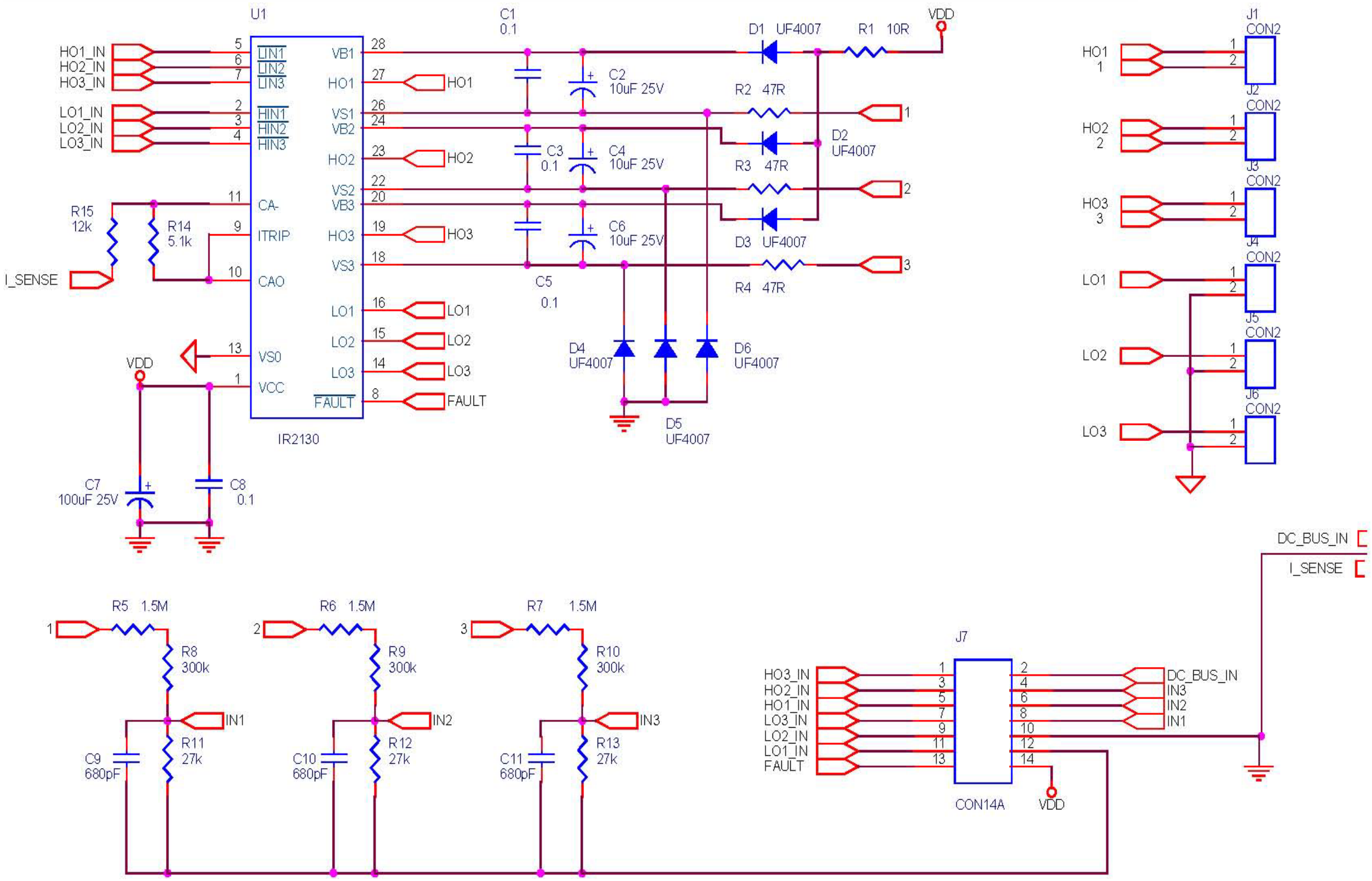
参考资料

1．William H． Yeadon、Alan W． Yeadon、McGraw-Hill于2001年出版的《小型电马达手册》。

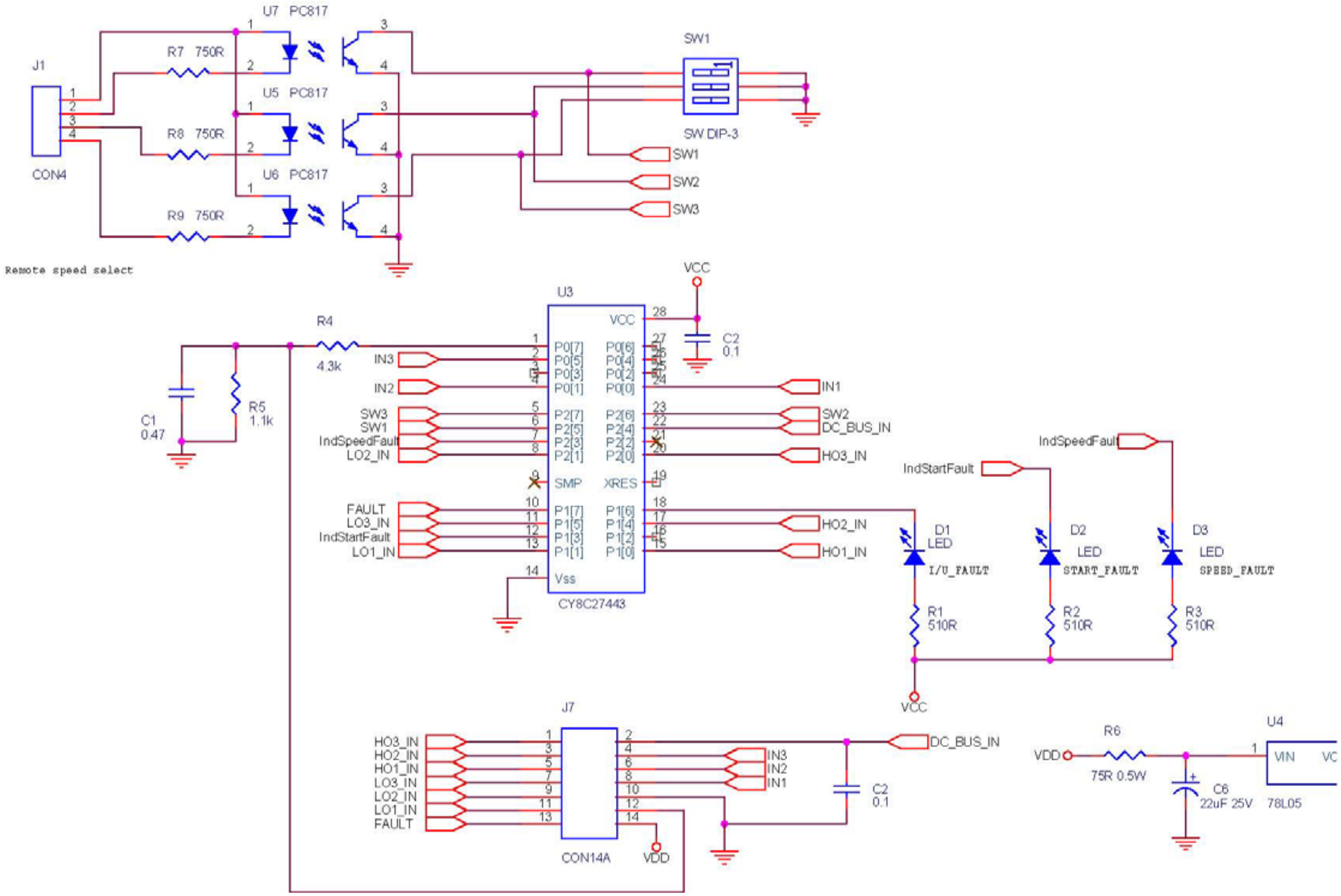
附录A.驱动器原理图



驱动器电源原理图


U1
IR2130
HO1_IN
HO2_IN
HO3_IN
LO1_IN
LO2_IN
LO3_IN
LIN1
LIN2
LIN3
HIN1
HIN2
HIN3
CA-
ITRIP
CAO
VS0
VCC
VB1
HO1
VS1
VB2
HO2
VS2
VB3
HO3
VS3
LO1
LO2
LO3
FAULT
R15 12k
R14 5.1k
I_SENSE
VDD
C7 100uF 25V
C8 0.1
C1 0.1
C2 10uF 25V
C3 0.1
C4 10uF 25V
C5 0.1
C6 10uF 25V
D1 UF4007
R1 10R
R2 47R
D2 UF4007
R3 47R
D3 UF4007
R4 47R
D4 UF4007
D5 UF4007
D6 UF4007
J1 CON2
J2 CON2
J3 CON2
J4 CON2
J5 CON2
J6 CON2
DC_BUS_IN
R5 1.5M
R6 1.5M
R7 1.5M
R8 300k
R9 300k
R10 300k
R11 27k
R12 27k
R13 27k
C9 680pF
C10 680pF
C11 680pF
IN1
IN2
IN3
J7
CON14A

IGBT驱动器原理图


U7 PC817
J1
R7 750R
U5 PC817
R8 750R
CON4
U6 PC817
R9 750R
Remote speed select
SW1
SW DIP-3
SW1
SW2
SW3
VCC
U3
R4
4.3k
IN3
IN2
SW3
SW1
IndSpeedFault
LO2_IN
FAULT
LO3_IN
IndStartFault
LO1_IN
C1
0.47
R5
1.1k
VCC
P0[7]
P0[5]
P0[3]
P0[1]
P2[7]
P2[5]
P2[3]
P2[1]
SMP
P1[7]
P1[5]
P1[3]
P1[1]
Vss
P0[6]
P0[4]
P0[2]
P0[0]
P2[6]
P2[4]
P2[2]
P2[0]
XRES
P1[6]
P1[4]
P1[2]
P1[0]
CY8C27443
C2
0.1
IN1
SW2
DC_BUS_IN
HO3_IN
HO2_IN
HO1_IN
IndSpeedFault
IndStartFault
D1
LED
I/U_FAULT
D2
LED
START_FAULT
D3
LED
SPEED_FAULT
R1
510R
R2
510R
R3
510R
VCC
J7
HO3_IN
HO2_IN
HO1_IN
LO3_IN
LO2_IN
LO1_IN
FAULT
CON14A
VDD
DC_BUS_IN
IN3
IN2
IN1
C2
0.1
R6
VDD
75R 0.5W
C6
22uF 25V
U4
VIN
78L05

CPU模块原理图

附录B.参考表

表2. IGBT电桥控制表

# Phase	Up A	Up B	Up C	Down A	Down B	Down C
0.	0	1	0	1	0	0
1.	0	0	1	1	0	0
2.	0	0	1	0	1	0
3.	1	0	0	0	1	0
4.	1	0	0	0	0	1
5.	0	1	0	0	0	1

表3.速度设置开关与额定速度

设置　速度（转数／分）　电频率（Hz）　过滤器频率　（Hz）　计数器单位周期*

Setting	Speed RPM	Electrical Frequency Hz	Filter Frequency Hz	Period in Counter Units*
b000	Stop	0	0	0
b001	2200	73.3	220	2182
b010	2400	80.0	240	2000
b011	2600	86.6	260	1846
b100	2800	93.3	280	1714
b101	3000	100.0	300	1600
b110	3200	106.6	320	1500
b111	3400	113.3	340	1412

* 计数器单位＝PWM周期*32*6

该驱动器选择了以下各项：

机械频率＝RPM／60（RPM是每分钟转数）

电频率＝机械频率*p

中断频率＝电频率*6（上升沿与下降沿）

上升沿中断频率＝电频率*3

p＝马达磁极对数

表4.马达自由运行启动期间的相位换向持续时间

Cycle	0	1	2	3	4	5 and More
Duration in PWM Period Units (200uS)	125	113	100	88	75	63

周期	0	1	2	3	4	大于或等于5
在PMW周期单位内（200uS）的持续时间	125	113	100	88	75	63

附录C.固件流程图

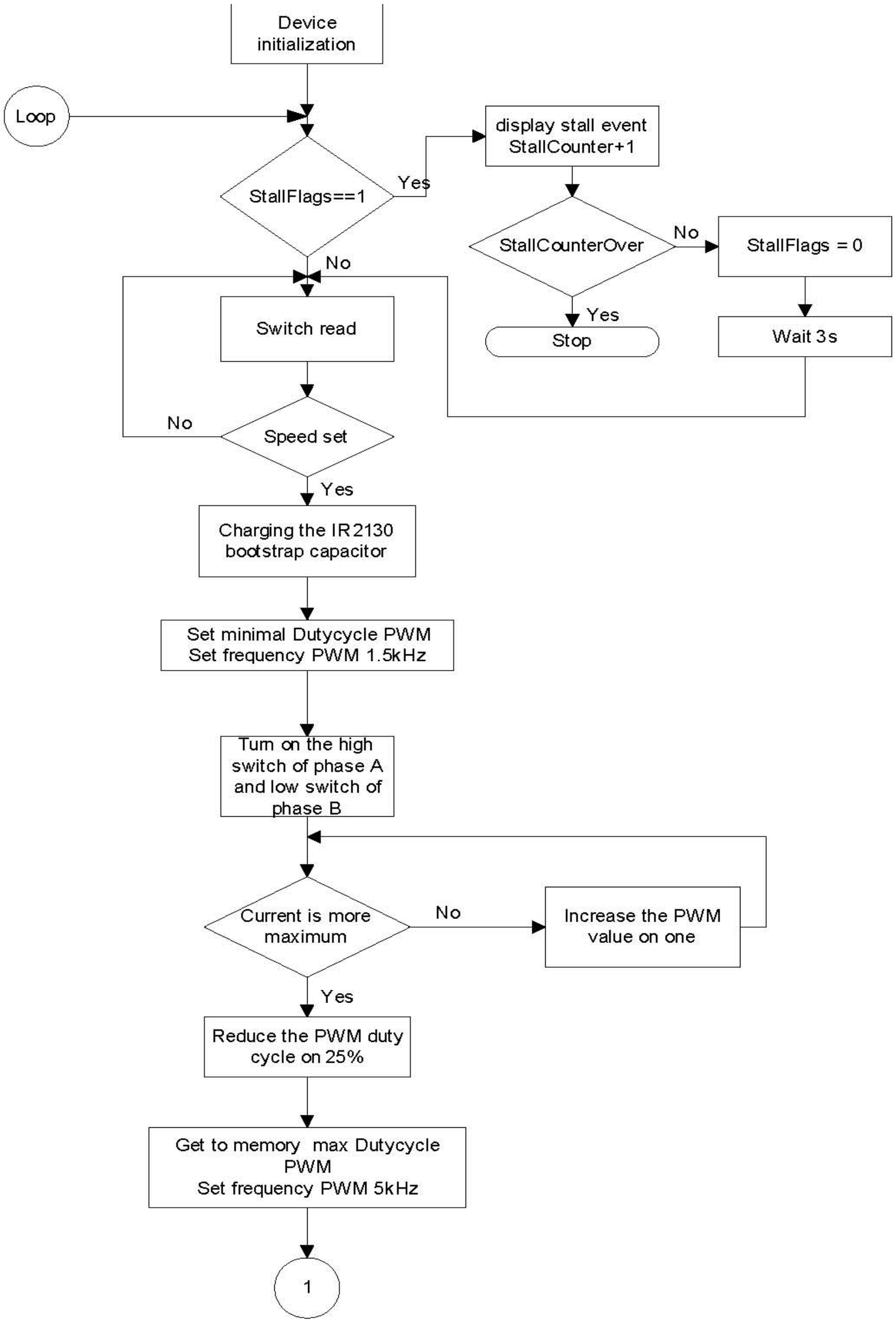


图4.驱动器初始化与**PWM**最大值的确定

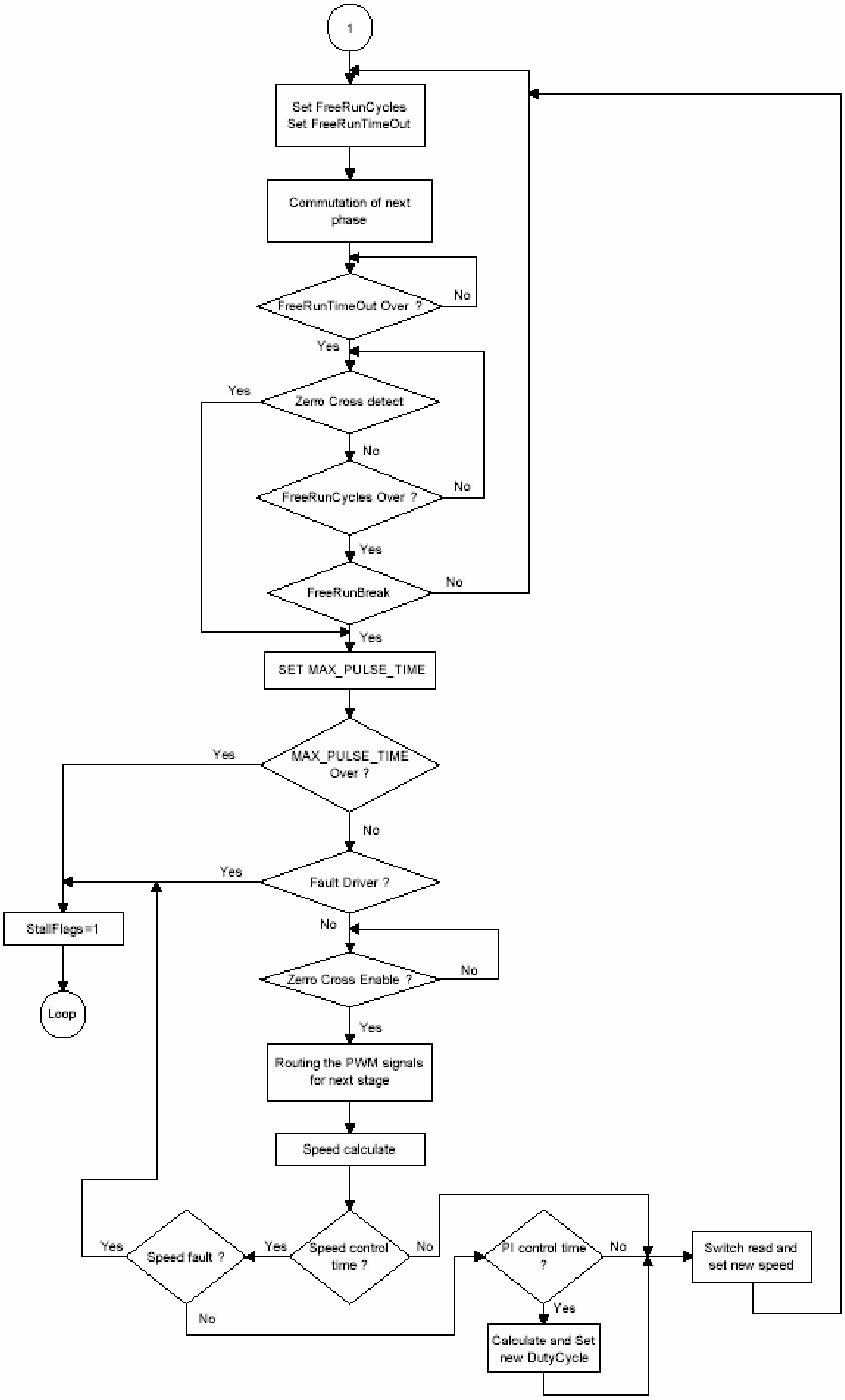
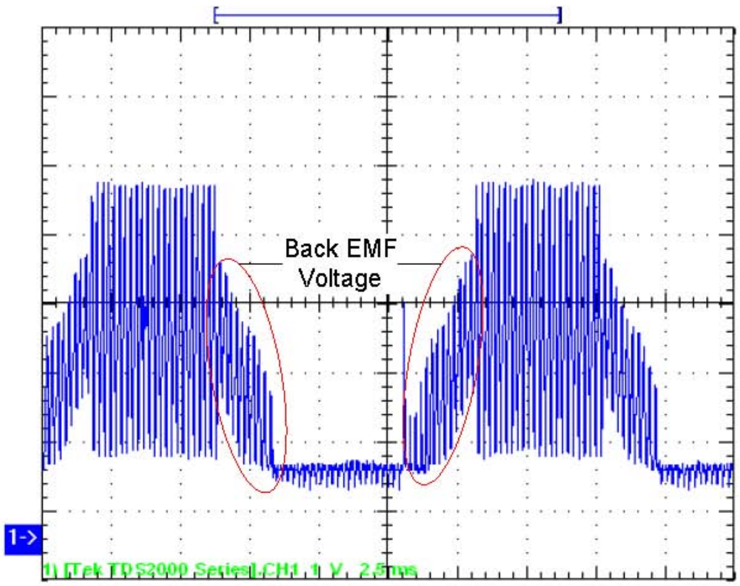
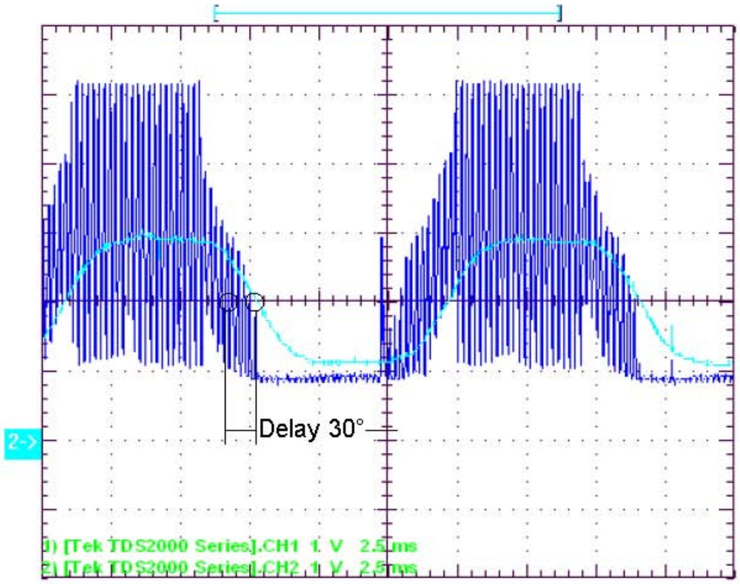

1
Set FreeRunCycles
Set FreeRunTimeOut
Commutation of next phase
FreeRunTimeOut Over ?
No
Yes
Zerro Cross detect
Yes
No
FreeRunCycles Over ?
No
Yes
FreeRunBreak
No
Yes
SET MAX_PULSE_TIME
MAX_PULSE_TIME Over ?
Yes
No
Fault Driver ?
Yes
StallFlags=1
Loop
No
Zerro Cross Enable ?
No
Yes
Routing the PWM signals for next stage
Speed calculate
Speed control time ?
Yes
No
Speed fault ?
Yes
No
PI control time ?
No
Yes
Calculate and Set new DutyCycle
Switch read and set new speed

图**5.** 马达操作

附录D.波形图（Scope Images）



(a)



(b)

图6．反电动势信号（a）与经过滤波的信号（b）

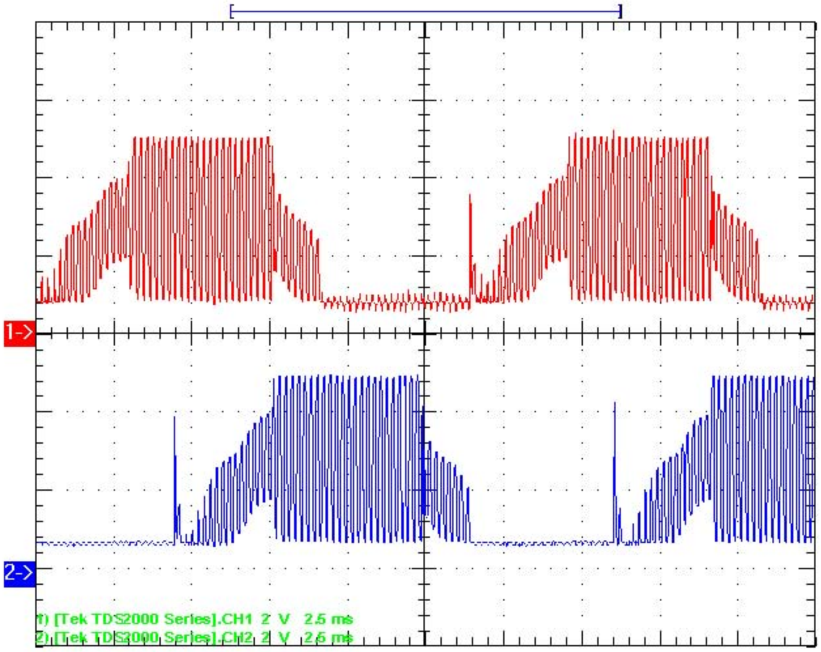


图**7.**马达相位信号

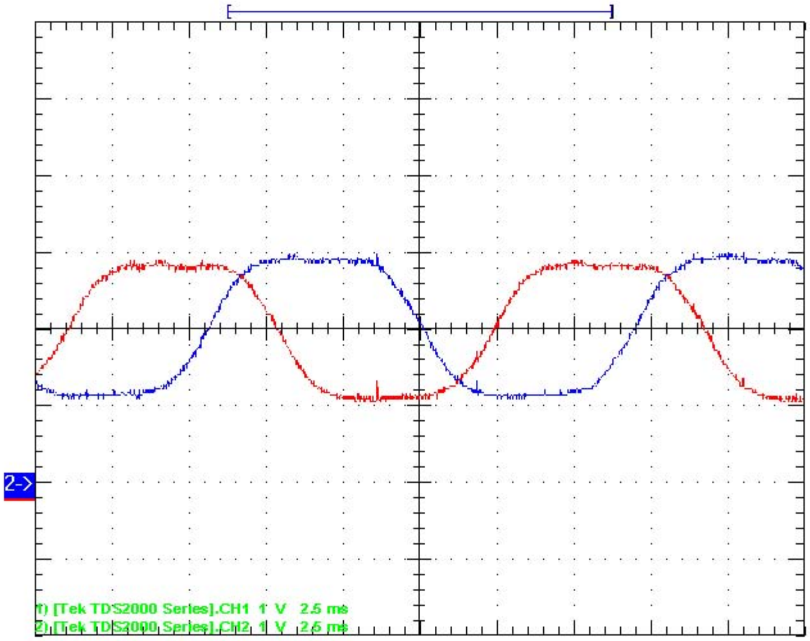
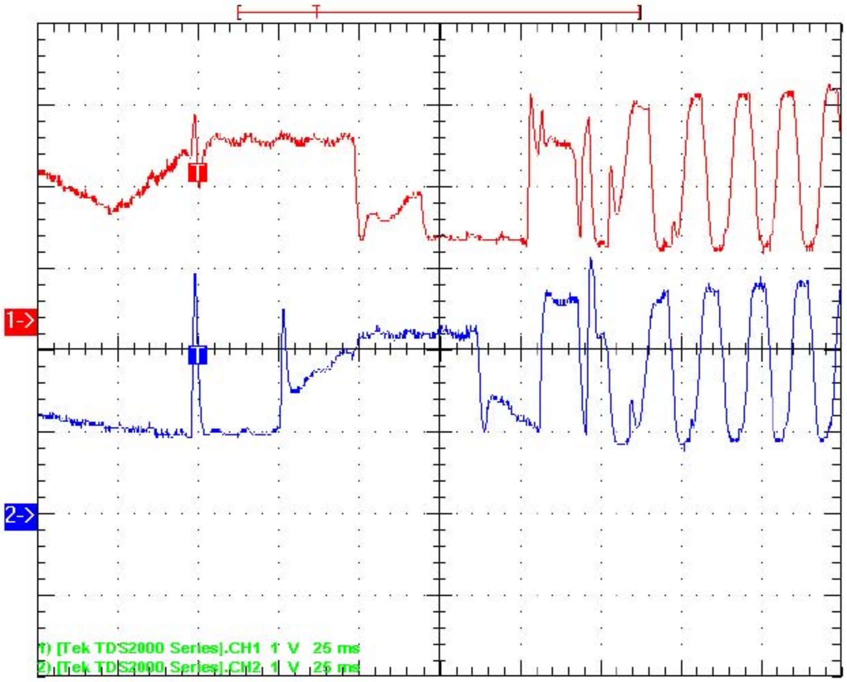


图**8.**滤波器输出信号



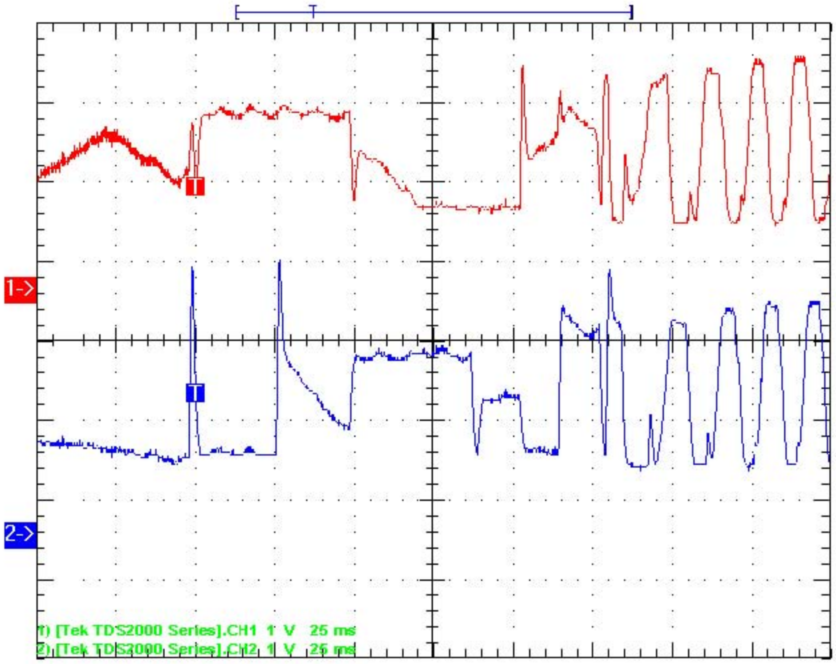


图**9.**不同负载的马达启动过程

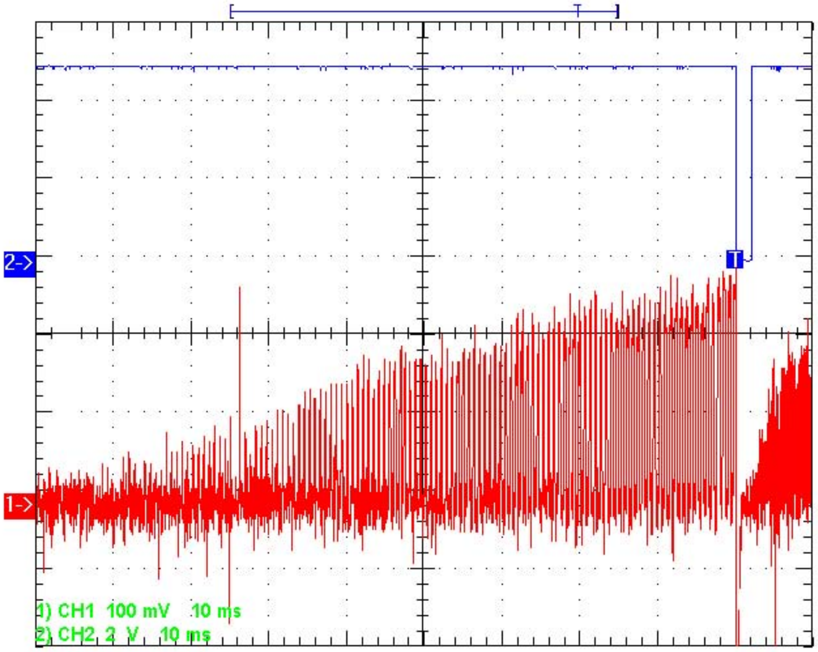
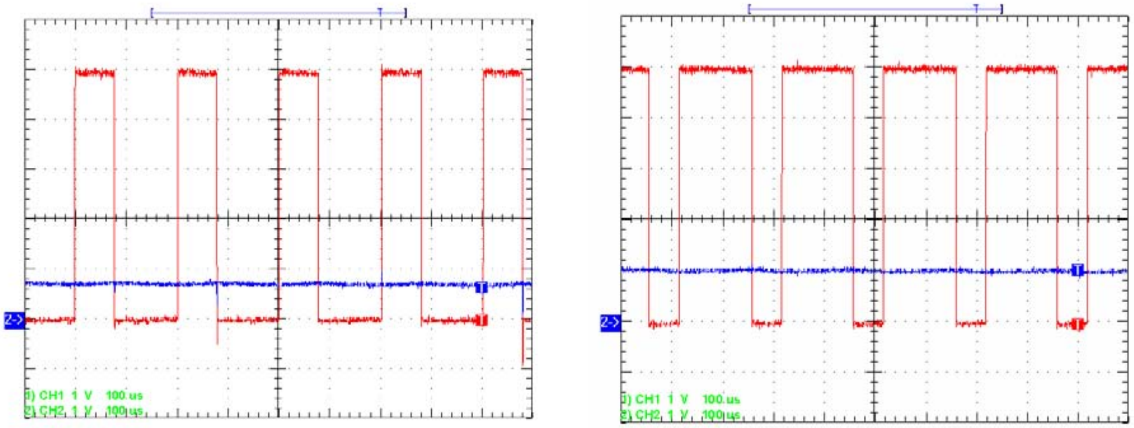
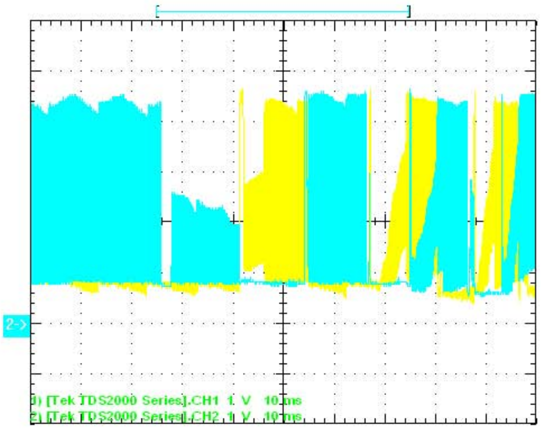


图**10.**最初确定的占空比波形图（驱动器准备阶段）

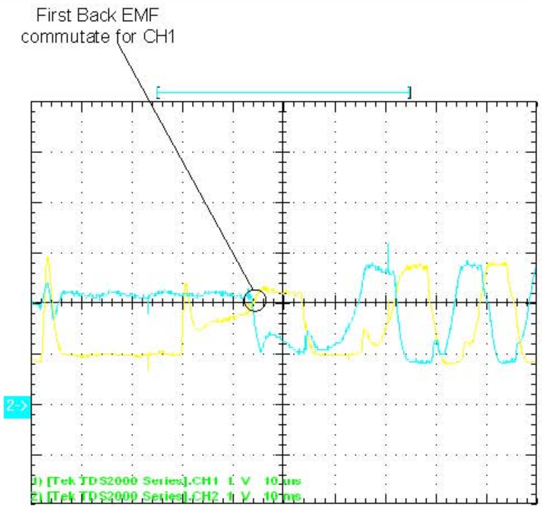


(a)
(b)

图**11.**针对两个不同的**PWM**值的补偿电压的波形图



(a)



(b)

图**12.** 当驱动器从自由运行阶段切换到感应阶段时所产生的未经滤波的反电动势信号（**a**）和通过**LPF**后的信号（**b**）。

附录E.驱动器图片

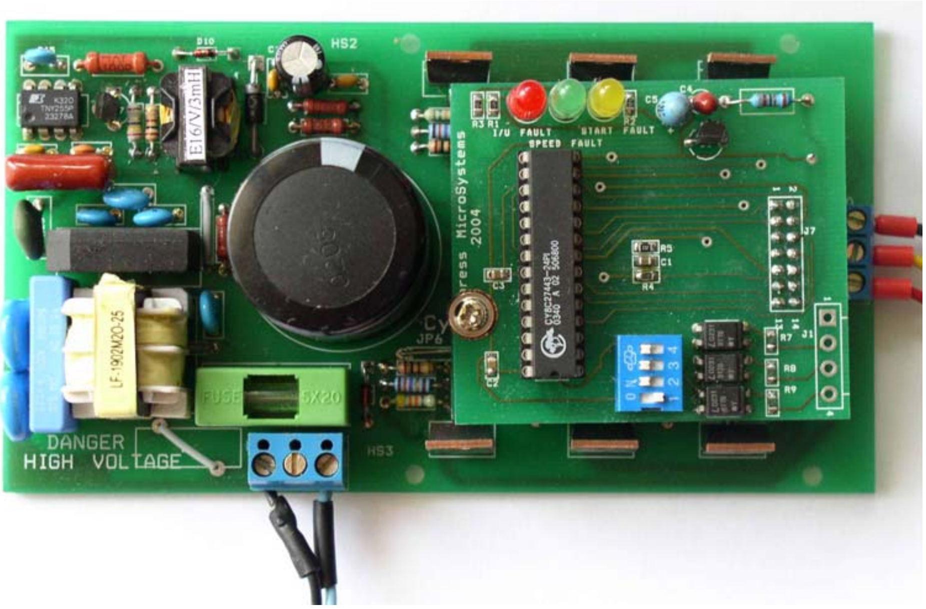


图**13.**已装配好的驱动器图片

注意：驱动器组件安装在三个分开的PCB上，以简化未来的升级与修改。

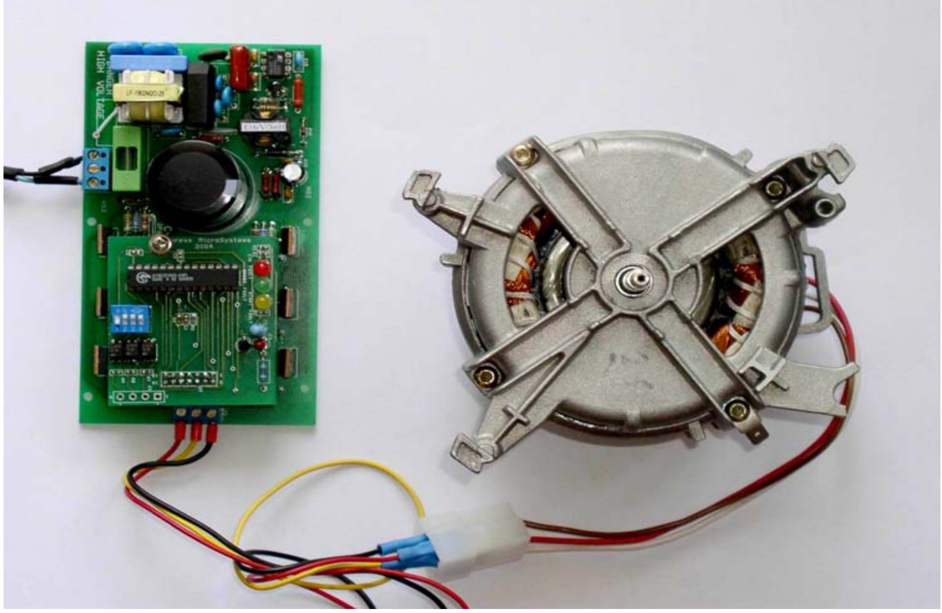


图**14.**马达为**75W**的驱动器图片

作者简介

姓名：Andrey Magarita
职位：高级应用工程师
背景：Andrey于1989年毕业于National University “Lvivska Polytechnika”（乌克兰利沃夫），目前在一家私营公司“Zuvs”担任高级应用工程师。他在嵌入式系统设计方面拥有多达15年的丰富经验。
联系方式：makar@ltf.lviv.net。

赛普拉斯微系统公司
地址：林恩伍德市D大厦西南街162号2700
邮编：98037
电话： 800.669.0557
传真： 425.787.4641

http://www.cypress.com/ / http://www.cypress.com/support/mysupport.cfm

© 赛普拉斯微系统公司2004年版权所有。保留所有权利。
PSoC（可编程片上系统）及PSoC Designer均是赛普拉斯微系统公司的商标。
本文提到的所有其他商标或注册商标均是其各自所有者的财产。
本文包括的信息如有更改，恕不另行通知。